# МЕХАНИКА
# MECHANICS







УДК 629.7.017.1
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-193-203

*Научная статья*



## Методика определения вероятности повреждения беспилотных летательных аппаратов в результате воздействия атмосферных факторов внешней среды

**Д. Г. Белоножко**[1] ✉, **И. Д. Королев** [1], **Ю. О. Чернышев** [2], **Н. Н. Венцов** [2]
[1] Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С. М. Штеменко, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Грибоедова, 18
[2] Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ staeer@rambler.ru

**Аннотация**
***Введение.*** Для эффективного применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) необходимо учитывать воздействия атмосферных факторов внешней среды. На основе существующего уровня развития научно-методического аппарата невозможно определить вероятность повреждения БЛА в условиях комплексного воздействия атмосферных факторов внешней среды и оценить целесообразность дальнейшего выполнения полётного задания. Нарушение процесса функционирования БЛА обусловлено воздействием атмосферных осадков, ветровых и температурных условий среды. Целью работы является разработка методики определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды, а также оценка быстродействия работы программного комплекса, реализующего разработанный алгоритм при использовании треугольных, трапециевидных, пятиугольных и Гауссовых функций принадлежности.
***Материалы и методы.*** Предложена методика, позволяющая с использованием теории нечеткой логики определить вероятность повреждения БЛА при неточностях и неопределённостях описания атмосферных воздействий внешней среды. Она учитывает возможные атмосферные факторы и позволяет определить вероятность повреждения БЛА при различных воздействиях. Вычислительная сложность алгоритма, реализующего методику, существенно зависит от количества качественных оценок атмосферных воздействий на БЛА.
***Результаты исследования.*** Предложена и протестирована методика определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды на базе нечетких множеств (треугольных, трапециевидных, пятиугольных, Гауссовых). Описано использование нечетких множеств для оценивания условий среды применения БЛА. Разработан алгоритм определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды. Проведён вычислительный эксперимент для определения сложности расчёта вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий при различных условиях среды: «умеренных условиях» при скорости ветра 3 м/с, интенсивности атмосферных осадков 0,8 мм/ч и температуре воздуха 5 ºС; «очень сложных условиях» внешней среды при скорости ветра 12 м/с, интенсивности атмосферных осадков 3,5 мм/ч и температуре воздуха –6 ºС. Установлено, что использование треугольных функций принадлежности для расчёта вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий обеспечивает более высокое быстродействие по сравнению с остальными (трапециевидными, пятиугольными, Гауссовыми).
***Обсуждение и заключения.*** Полученные при реализации методики значения вероятностей повреждения БЛА в условиях атмосферных воздействий внешней среды могут использоваться на этапе предполётной подготовки и в процессе полёта для оценки целесообразности дальнейшего выполнения полётного задания. На основе проведенного анализа применения рассмотренных форм функций принадлежности даны рекомендации по их применению. Использование алгоритмов с треугольными функциями принадлежности обеспечит высокое быстродействие работы систем управления БЛА (СУ БЛА).

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, функция принадлежности, нечеткие множества, математическая модель, управление, атмосферные воздействия.

**Благодарности.** Соавторы выражают искреннюю благодарность Чернышеву Юрию Олеговичу за его наставничество, ценные советы, критику и живое участие в данной работе.

**Для цитирования.** Методика определения вероятности повреждения беспилотных летательных аппаратов в результате воздействия атмосферных факторов внешней среды / Д. Г. Белоножко, И. Д. Королев, Ю. О. Чернышев, Н. Н. Венцов // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 193–203. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-193-203

*Original article*

## Methodology for Determining the Probability of Damage to UAV as a Result of Exposure to Atmospheric Environmental Factors

**Dmitriy G. Belonozhko**[1] ✉, **Igor D. Korolev**[1], **Yury O. Chernyshev**[2], **Nikolay N. Ventsov**[2]

[1] Krasnodar Higher Military School named after army general S. M. Shtemenko, 4, ul. Krasina, Krasnodar, Russian Federation

[2] Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract**

***Introduction.*** For the effective use of unmanned aerial vehicles (UAV), it is required to take into account the impact of atmospheric environmental factors. Based on the existing level of development of the research and methodological apparatus, it is impossible to determine the probability of damage to the UAV under the conditions of complex exposure to atmospheric environmental factors and to assess the feasibility of further performance of the flight task. Violation of the UAV operation process is caused by the influence of atmospheric precipitation, wind and temperature conditions of the environment. The work aims at the development of a methodology for determining the probability of damage to UAV as a result of exposure to atmospheric environmental factors, as well as to evaluate the performance of the software package implementing the developed algorithm using triangular, trapezoidal, pentagonal, and Gaussian membership functions.

***Materials and Methods.*** A technique is proposed that makes it possible, using the theory of fuzzy logic, to determine the probability of damage to the UAV with inaccuracies and uncertainties in the description of atmospheric effects of the environment. It takes into account possible atmospheric forcing and enables to determine the probability of damage to the UAV under various atmospheric influences. The computational complexity of the algorithm implementing the technique depends significantly on the number of qualitative assessments of atmospheric impacts on UAV.

***Results.*** A method for determining the probability of damage to UAV as a result of exposure to atmospheric environmental factors based on fuzzy sets (triangular, trapezoidal, pentagonal, Gaussian) was proposed and tested. The use of fuzzy sets for estimating the conditions of the UAV application environment was described. An algorithm was developed to determine the probability of damage to the UAV as a result of exposure to atmospheric environmental factors. A computational experiment was carried out to determine the complexity of calculating the probability of UAV damage as a result of atmospheric forcing under various environmental conditions: “moderate conditions” at a wind speed of 3 m/s, precipitation intensity of 0.8 mm/h, and air temperature of 5 °C; “very heavy conditions” of the external environment at a wind speed of 12 m/s, precipitation intensity 3.5 mm/h, and air temperature of –6 ºC. It was established that the use of triangular membership functions to calculate the probability of damage to the UAV as a result of atmospheric forcing provided higher performance compared to the rest ones (trapezoidal, pentagonal, Gaussian).

***Discussion and Conclusions.*** The values of the UAV damage probabilities obtained during the implementation of the methodology under atmospheric environmental influences can be used at the pre-flight preparation stage and during the flight to assess the feasibility of further performance of the flight task. Based on the analysis of the application of the considered forms of membership functions, recommendations for their application are given. The use of algorithms with triangular membership functions will provide high performance of UAV control systems (UAV CS).

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, membership function, fuzzy sets, mathematical model, control, atmospheric forcing.

**Achnowledgments.** The co-authors express their sincere gratitude to Yuri Olegovich Chernyshev for his mentoring, valuable advice, criticism, and lively participation in this work.

**For citation.** D. G. Belonozhko, I. D. Korolev, Yu. O. Chernyshev, N. N. Ventsov. Methodology for Determining the Probability of Damage to UAV as a Result of Exposure to Atmospheric Environmental Factors. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 193–203. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-193-203

**Введение.** Анализ опыта применения БЛА показал, что особенно актуальным является повышение эффективности применения БЛА в условиях воздействий внешней среды [1–4]. Оборудование современных беспилотных летательных аппаратов позволяет производить измерения и оценку состояния технических систем, параметров полета и внешней среды [2].

При быстром обновлении текущей полетной информации и ее большом объеме реализация управления сталкивается с проблемой обеспечения устойчивого функционирования БЛА в условиях воздействия внешней среды. Стоит отметить, что человеческие способности ограничены, а в условиях резко меняющейся обстановки ряд параметров БЛА и внешней среды, таких как температура и обороты двигателя, скорость ветра и интенсивность осадков, в силу ограниченности человеческих возможностей могут быть не учтены или упущены из виду. Подобные неточности управления могут привести к выходу из строя оборудования БЛА или его повреждению [3]. Влияние факторов внешней среды на БЛА может существенно снизить качество выполнения задания, а при определенных значениях параметров внешних воздействий и вовсе исключить возможность применения БЛА [4].

В этой связи решение задач, связанных с сохранением эффективного функционирования БЛА в различных атмосферных условиях, является важным этапом при составлении требований к бортовому оборудованию БЛА, обеспечивающему безопасность полетов в аварийных ситуациях, возникающих под действием различных погодных явлений [4].

**Материалы и методы.** Решение проблемы представляется авторам в автоматизации процесса оценки параметров внешней среды для определения вероятности повреждения БЛА и выработки управления, соответствующего текущей обстановке. В работах [1–5] в качестве дестабилизирующих воздействий внешней среды рассматриваются метеорологические условия, например, атмосферные осадки, ветровые нагрузки, температура, давление воздуха и влажность. Для описания атмосферных воздействий внешней среды[1] используется вероятностная модель в сочетании с теорией случайных процессов. Известен также способ оценки интенсивности осадков и водности облаков на основе данных дистанционных измерений[2]. Авторами также отмечается, что естественная изменчивость и стохастический характер атмосферных условий не дают возможность установить строгие математические зависимости для описания атмосферных условий среды.

При неопределенности параметров и неполной информации о состоянии внешней среды не всегда возможно представить ее непреднамеренное воздействие в виде четких величин. Эта проблема может быть решена с помощью теории нечетких множеств. В случае ее применения нет необходимости знать точную математическую модель атмосферных воздействий внешней среды для оценки ее влияния на БЛА[3]. Оценка условий функционирования сложных систем является одной из областей, где нечеткие множества широко используются для устранения неточной природы воздействия внешней среды [6].

Таким образом, анализ известных исследований в данной области[3] показывает, что в автоматизированных системах прогнозирования и поддержки принятия решений в условиях недостатка и неопределенности исходной информации для её обработки, хорошо зарекомендовали себя методы нечеткой логики.

**Результаты исследования**

**Разработка методики определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды**

В [6] отмечается особенность, которая отличает интеллектуальную систему автоматического управления от построенной по «традиционной» схеме. Она связана с использованием механизмов обработки знаний для выполнения требуемых функций в неопределенных (или неполно заданных) условиях при случайном характере внешних возмущений. Интеллектуализация процесса функционирования БЛА для учета факторов неопределенности может быть достигнута за счет применения базы знаний и механизма логического вывода [6].

[1] Вероятностная модель поиска и обнаружения наземных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов в условиях нерегулярных воздействий внешней среды / И. Е. Кузнецов [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : мат-лы VI междунар. конф. и молодежной школы. В 4 т. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2020. Т. 3. С. 152–156.
[2] Кузнецов И. Е., Булгин Д. В. Методика оценки интенсивности осадков и водности облаков на основе данных дистанционных измерений // Факультет компьютерных наук Воронежского ун-та : [сайт]. URL: https://www.cs.vsu.ru/ipmt-conf/conf/2021/works/2/1744.dokl.pdf
[3] Черепанов Д. В., Кузнецов И. Е. Модель прогнозирования степени сложности метеоусловий с учетом теории нечеткой логики // Факультет компьютерных наук Воронежского ун-та : [сайт]. URL: https://www.cs.vsu.ru/ipmt-conf/conf/2021/works/2.85/1793.dokl.pdf

Чтобы определить значение вероятности повреждения БЛА в результате воздействия факторов внешней среды необходимо:

1. Сформулировать нечеткие оценки атмосферных воздействий:
– скорости ветра;
– интенсивности осадков;
– температурных условий среды.

2. Разработать нечеткую модель вычисления вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды.

3. Создать базу правил нечеткого логического вывода влияния атмосферных воздействий на БЛА.

4. Осуществить нечеткий логический вывод.

5. Произвести дефаззификацию нечеткого значения вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды $P_{\text{АВ}}$.

Функциональная схема методики представлена на рис. 1.




Рис. 1. Функциональная схема методики определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды

Требуется определить вероятность повреждения БЛА на основе анализа входной нечеткой ситуации. Рассмотрим подробно этапы работы предложенной методики.

**Оценка условий среды применения БЛА**

Атмосферные факторы внешней среды (ветер, осадки и температура воздуха) в процессе полета могут изменяться. Динамическое изменение параметров среды оказывает значительное влияние на устойчивость функционирования БЛА [7]. В качестве типового рассматривается БЛА малой дальности, выполненный по аэродинамической схеме самолетного типа со скоростями полета в диапазоне от 20 до 60 м/с. Обледенение поверхностей такого БЛА может привести к изменению его массы, а также аэродинамических характеристик. Скорость ветра может изменяться в зависимости от высоты, времени полёта и имеет существенное влияние на БЛА рассматриваемого класса [8]. По этой причине оценку атмосферных воздействий целесообразно осуществлять на основе динамических нечетких подходов. Исходными данными для функциональной модели являются условия среды: скорость ветра $e$, интенсивность осадков $g$ и температура воздуха $t$.

Для оценки влияния ветра, воздействующего на БЛА в момент времени $t$, введём множество треугольных нечетких чисел:

$$E(t) = \left\{\tilde{E}_1(t), \tilde{E}_2(t), \dots, \tilde{E}_w(t), \dots, \tilde{E}_{N_{E(t)}}(t)\right\}, \quad (1)$$

где $E(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущей скорости ветра $e$ нечетким оценкам воздействий ветра на БЛА в момент времени $t$; $\tilde{E}_w(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущей скорости ветра $e$ нечеткой оценке воздействий ветра на БЛА в момент времени $t$; $w = \overline{1, N_{E(t)}}$.

В соответствии с понятием нечеткого множества, треугольное нечеткое число $\tilde{E}_w(t)$ можно понимать как [9, 10]:

$$\tilde{E}_w(t) = \left\{\left(e, \mu_{\tilde{E}_w(t)}(e)\right)\right\}, \quad (2)$$

где $\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e)$ — функция принадлежности скорости ветра $e$ к оценке воздействия $\tilde{E}_w(t)$ ветра на БЛА.

В рамках разрабатываемой модели качественная оценка воздействия ветра на БЛА зависит только от его скорости, т. е. не учитываются возможные неоднородности ветрового потока и его направление.

Функция принадлежности треугольного нечеткого числа $\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e)$ может быть представлена кортежем из трёх элементов:

$$\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e) = \langle l_{\tilde{E}_w}(t); c_{\tilde{E}_w}(t), r_{\tilde{E}_w}(t)\rangle, \quad (3)$$

где $c_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкое значение скорости ветра, наиболее точно соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени $t$; $l_{\tilde{E}_w}(t)$ и $r_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкие значения скорости ветра в наименьшей не нулевой степени соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени $t$. Значения $l_{\tilde{E}_w}(t)$ и $r_{\tilde{E}_w}(t)$ определяют нечеткость оценки $\tilde{E}_w(t)$. В случае, если $l_{\tilde{E}_w}(t) = r_{\tilde{E}_w}(t) = c_{\tilde{E}_w}(t)$, то оценка становится четкой.

Например, $\tilde{E}_1(t)$ может означать несущественную оценку воздействия ветра на БЛА. Если экспертами принято решение, что максимальная скорость ветра, при которой его воздействие на БЛА в текущих условиях полёта в момент времени $t$ можно трактовать как несущественное, равна 0,8 м/с, то функция принадлежности нечеткого числа примет вид $\mu_{\tilde{E}_1(t)}(e)$ = (0;0;0,8). Так как первый и второй элементы кортежа равны нулю, область не нулевой принадлежности находится на замкнутом промежутке [0, 0,8]. Для определения степени принадлежности $\mu_{\tilde{E}_1(t)}(e)$ воздействия ветра со скоростью $e$ к нечеткой оценке воздействия $\tilde{E}_1(t)$ надо подставить $e$ в уравнение прямой, проходящей через точки (0;1) и (0,8;0).

В процессе полета БЛА может в автономном режиме определять фактическую скорость ветра. На основе заданных экспертами значений кортежей из трёх элементов, по аналогии с приведённым выше примером, сформулируем возможные оценки влияния ветра на БЛА. Для этого значения треугольных функций принадлежности нечетких множеств $\tilde{E}_w(t)$ от значений скорости ветра $e$ представим графиками (рис. 2):

– $\tilde{E}_1(t)$ — «несущественное влияние», $\mu_{\tilde{E}_1(t)}(e)$ = (0;0;0,8);

– $\tilde{E}_2(t)$ — «очень слабое влияние», $\mu_{\tilde{E}_2(t)}(e)$ = (0;1;3);

– $\tilde{E}_3(t)$ — «слабое влияние», $\mu_{\tilde{E}_3(t)}(e)$ = (0,2;2,5;4,8);

– $\tilde{E}_4(t)$ — «сильное влияние», $\mu_{\tilde{E}_4(t)}(e)$ = (1,5;4,2;6,9);

– $\tilde{E}_5(t)$ — «очень сильное влияние», $\mu_{\tilde{E}_5(t)}(e)$ = (1,5;7;12,5);

– $\tilde{E}_6(t)$ — «опасное влияние», $\mu_{\tilde{E}_6(t)}(e)$ = (5;11;18);

– $\tilde{E}_7(t)$ — «очень опасное влияние», $\mu_{\tilde{E}_7(t)}(e) = (10;15;\infty)$.

По аналогии с оценкой влияния ветра рассмотрим оценки влияния атмосферных осадков и температуры, воздействующих на БЛА, в момент времени $t$.

Для оценки влияния атмосферных осадков введём множество треугольных нечетких чисел:

$$G(t) = \left\{\tilde{G}_1(t), \tilde{G}_2(t), \dots, \tilde{G}_h(t), \dots, \tilde{G}_{N_{G(t)}}(t)\right\}, \quad (4)$$

где $G(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущей интенсивности атмосферных осадков $g$ нечетким оценкам воздействий осадков на БЛА в момент времени $t$; $\tilde{G}_h(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущей интенсивности осадков $g$ нечеткой оценке воздействий осадков на БЛА в момент времени t; $h=\overline{1, N_{G(t)}}$.

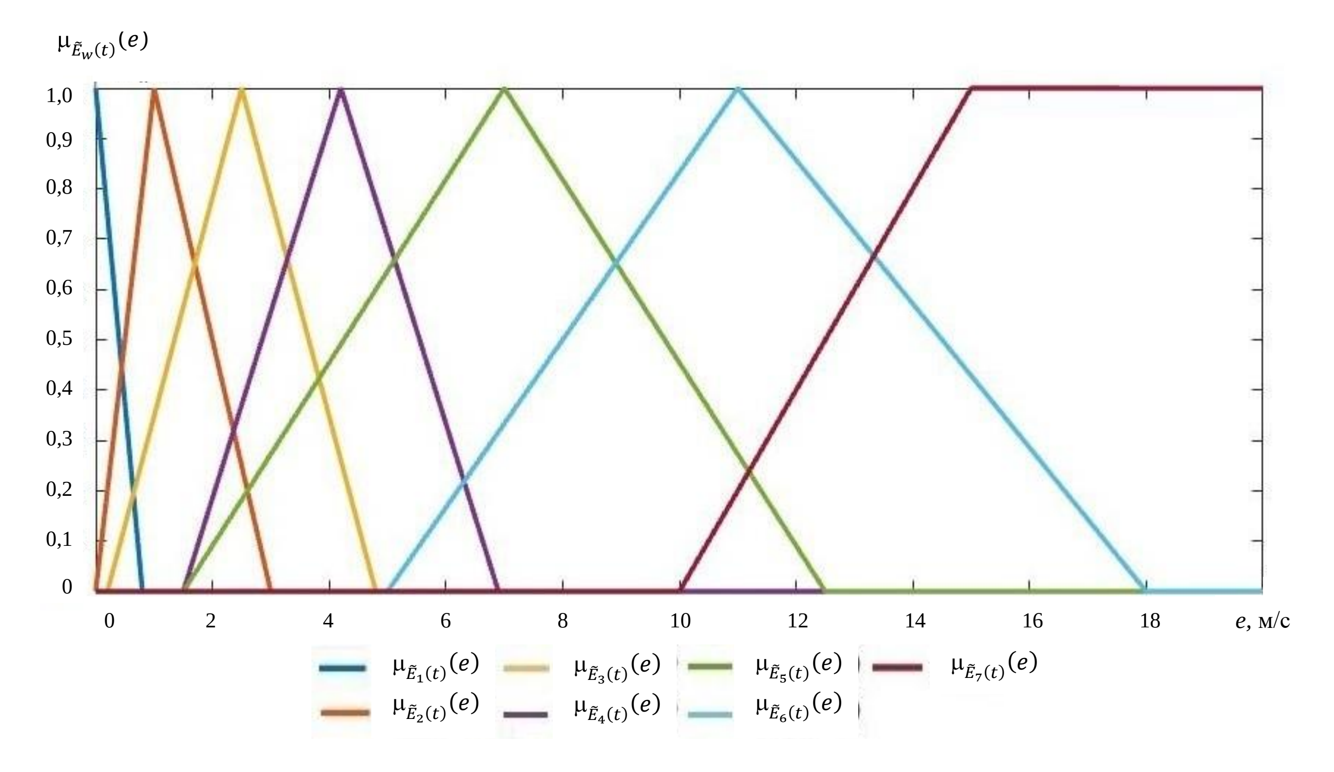



Рис. 2. Графики зависимостей треугольных функций принадлежности нечетких множеств $\tilde{E}_w(t)$ от значений скорости ветра $e$

Для оценки влияния температуры введём множество треугольных нечетких чисел:

$$Q(t) = \left\{\tilde{Q}_1(t), \tilde{Q}_2(t), \dots, \tilde{Q}_s(t), \dots, \tilde{Q}_{N_{Q(t)}}(t)\right\}, \quad (5)$$

где $Q(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущей температуры $q$ нечетким оценкам воздействий температуры на БЛА в момент времени $t$; $\tilde{Q}_s(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущей температуры $q$ нечеткой оценке воздействий температуры на БЛА в момент времени $t$; $s=\overline{1, N_{Q(t)}}$.

В разрабатываемой модели влияние погодных условий оценивается на основе трех множеств $E(t)$, $G(t)$, и $Q(t)$. Элементам этих множеств соответствуют треугольные функции принадлежности, что упрощает адаптацию модели. Для корректировки функции принадлежности необходимо только изменить значения воздействия атмосферы, которые в наибольшей и/или наименьшей степени соответствуют адаптируемой нечеткой оценке.

**Алгоритм определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды**

Для реализации методики разработан алгоритм определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды. Алгоритм позволяет в условиях неопределенности учитывать

влияние атмосферных факторов среды для вычисления вероятности повреждения БЛА в соответствии с текущей обстановкой. Исходными данными для алгоритма являются нечеткие множества $\tilde{E}_w(t)$, $\tilde{G}_h(t)$ и $\tilde{Q}_s(t)$.

На рис. 3 представлена его структурная схема.

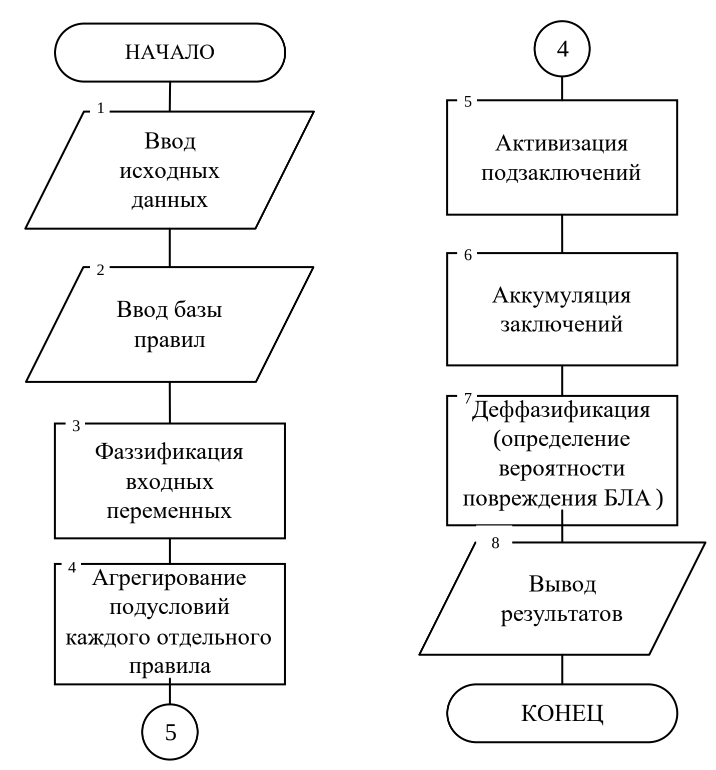



Рис. 3. Структурная схема алгоритма определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды

**Определение вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды**

В работах [4, 5] отмечается естественная изменчивость и стохастический характер атмосферных условий. В связи с тем, что атмосферные воздействия внешней среды имеют динамический характер, целесообразно учитывать это обстоятельство при построении модели определения вероятности повреждения (выхода из строя оборудования) БЛА. Введём множество треугольных нечетких чисел:

$$I(t) = \left\{\tilde{I}_1(t), \tilde{I}_2(t), \ldots, \tilde{I}_z(t), \ldots, \tilde{I}_{N_{I(t)}}(t)\right\}, \quad (6)$$

где $I(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущего значения вероятности повреждения БЛА $P_{\text{АВ}}$ в момент времени $t$; $\tilde{I}_z(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущего значения вероятности повреждения БЛА $P_{\text{АВ}}$ к нечеткой оценке уровня воздействия на БЛА атмосферных факторов среды в момент времени $t$; $z = \overline{1, N_{I(t)}}$.

Применительно к уровням работоспособности БЛА [11] (работоспособное, ограниченно работоспособное и неработоспособное состояние) рассмотрим следующие вероятности повреждения БЛА: $\tilde{I}_1(t)$ — «низкая» (примерно 0,2), $\tilde{I}_2(t)$ — «средняя» (примерно 0,5) и $\tilde{I}_3(t)$ — «высокая» (примерно 0,8). Треугольное нечеткое число $\tilde{I}_z(t)$ представим как [9, 10]:

$$\tilde{I}_z(t) = \left\{\left(P_{\text{АВ}}, \mu_{\tilde{I}_z(t)}(P_{\text{АВ}})\right)\right\}, z = \overline{1,3}, \quad (7)$$

где $\mu_{\tilde{I}_z(t)}(P_{\text{АВ}})$ — функция принадлежности вероятности повреждения БЛА $P_{\text{АВ}}$ к оценке воздействия $\tilde{I}_z(t)$ ветра на БЛА.

В связи с тем, что рассматриваемая модель имеет динамический характер, составлению базы правил нечеткого логического вывода должно предшествовать изучение влияния атмосферных условий на вероятность повреждения БЛА. Для этого была проведена серия опытов в различных условиях среды. На основании экспертных оценок статистических данных формируется база правил нечеткого логического вывода [10]. Правила определения качественных оценок вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий внешней среды формализованы при помощи нечетких множеств следующим образом:

$$\text{If } q \text{ is } \tilde{Q}_s(t) \text{ and } e \text{ is } \tilde{E}_w(t) \text{ and } g \text{ is } \tilde{G}_h(t) \text{ then is } \tilde{I}_z(t). \quad (8)$$

Т. е. при одновременных условиях минимально достаточной принадлежности:

– температуры $q$ к нечеткой оценке воздействия температуры $\tilde{Q}_s(t)$;

– принадлежности скорости ветра $e$ к нечеткой оценке воздействия ветра $\tilde{E}_w(t)$;

– принадлежности интенсивности осадков $g$ к нечеткой оценке воздействия осадков $\tilde{G}_h(t)$ актуальной становится нечеткая оценка вероятности $\tilde{I}_z(t)$.

Для получения четкого значения $P^*_{\text{АВ}}(t)$ вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий внешней среды в момент времени *t*, необходимо выполнить дефаззификацию соответствующего нечеткого результата по формуле [10]:

$$P^*_{\text{АВ}}(t) = \frac{\int_0^1 \tilde{P}_{\text{АВ}} \cdot \mu^{\text{рез}}_{\tilde{I}_z(t)}(\tilde{P}_{\text{АВ}}) d\tilde{P}_{\text{АВ}}}{\int_0^1 \mu^{\text{рез}}_{\tilde{I}_z(t)}(\tilde{P}_{\text{АВ}}) d\tilde{P}_{\text{АВ}}}, \tag{9}$$

где $\mu^{\text{рез}}_{\tilde{I}_z(t)}(\tilde{P}_{\text{АВ}})$ — результирующая функция принадлежности нечеткого множества $\tilde{I}_z$, представляющего общий вывод (заключение) из всех правил (8); $\tilde{P}_{\text{АВ}}$ — выходная переменная нечеткого логического вывода, характеризующая нечеткое значение вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды.

Таким образом, интеллектуализация процесса функционирования достигается за счет применения базы знаний и механизма логического вывода и обеспечивает учет факторов неопределенности [6].

**Схема процесса функционирования БЛА в условиях воздействия среды**

Для вычисления значения вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды необходимо осуществить нечеткий логический вывод. Он заключается в последовательном выполнении операций агрегирования, активизации и аккумуляции [10]. Схема процесса функционирования БЛА в условиях воздействия среды представлена на рис. 4.

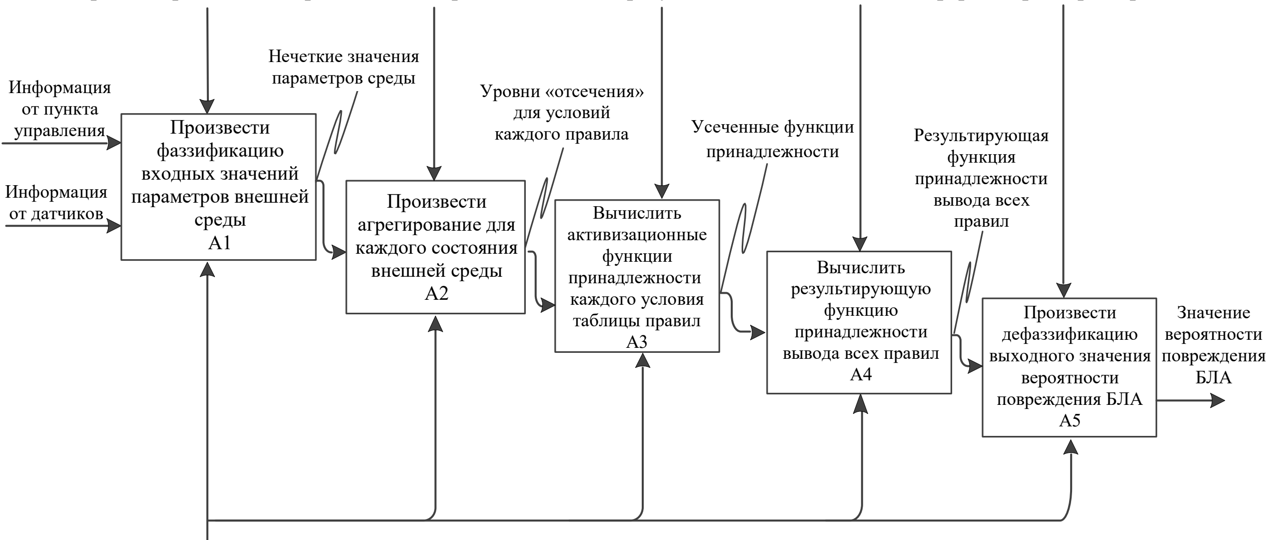



Рис. 4. Схема процесса функционирования БЛА в условиях воздействия атмосферных факторов среды

**Вычислительный эксперимент**

В работе [12] для выявления формальных подходов к работе с неопределенностями проведен анализ зарубежной периодической литературы за последние годы. Сделан вывод о целесообразности применении *n*-угольных чисел для определения точности формализации неопределенности. Так, при использовании треугольного представления нечетких чисел [10] каждое исходное нечеткое число описывается тремя скалярными значениями, что существенно упрощает вычислительный процесс.

Во многих случаях треугольные и трапециевидные представления нечетких чисел оказываются недостаточными. Если необходимо учитывать более сложное влияние неопределенностей, например, по причине большой подверженности оборудования, установленного на БЛА, воздействию атмосферных осадков, целесообразно использовать более сложные формы функций принадлежности [12, 13]. Так, в работе [13] в качестве альтернативы изучены пятиугольные нечеткие числа, которые гораздо точнее отражают неопределенности.

Рассмотрим основные наиболее применяемые функции принадлежности для представления нечетко определенных лингвистических термов: гауссовы, треугольные, трапециевидные [10] и пятиугольные нечеткие числа [13, 14].

На основании анализа работ [13, 14] представим пятиугольную функции принадлежности элементов к нечетким множествам воздействий ветровых нагрузок $\tilde{E}_w(t)$ в виде кортежа:

$$\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e) = \langle l_{\tilde{E}_w}(t); k_{\tilde{E}_w}(t); c_{\tilde{E}_w}(t); p_{\tilde{E}_w}(t); r_{\tilde{E}_w}(t), \alpha\rangle, \tag{10}$$

где $c_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкое значение скорости ветра наиболее точно соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени *t*; $l_{\tilde{E}_w}(t)$ и $r_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкие значения скорости ветра в наименьшей (не нулевой) степени соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени *t*; $k_{\tilde{E}_w}(t)$ и $p_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкие значения скорости ветра со степенью α (не нулевой) соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени *t*. Значения $k_{\tilde{E}_w}(t)$ и $p_{\tilde{E}_w}(t)$ определяют нечеткость оценки $\tilde{E}_w(t)$. В случае если $l_{\tilde{E}_w}(t) = r_{\tilde{E}_w}(t) = k_{\tilde{E}_w}(t) = p_{\tilde{E}_w}(t)$ получаем треугольное нечеткое число. Изменяя значения уровня α получаем различную форму пятиугольной функции принадлежности (рис. 5).

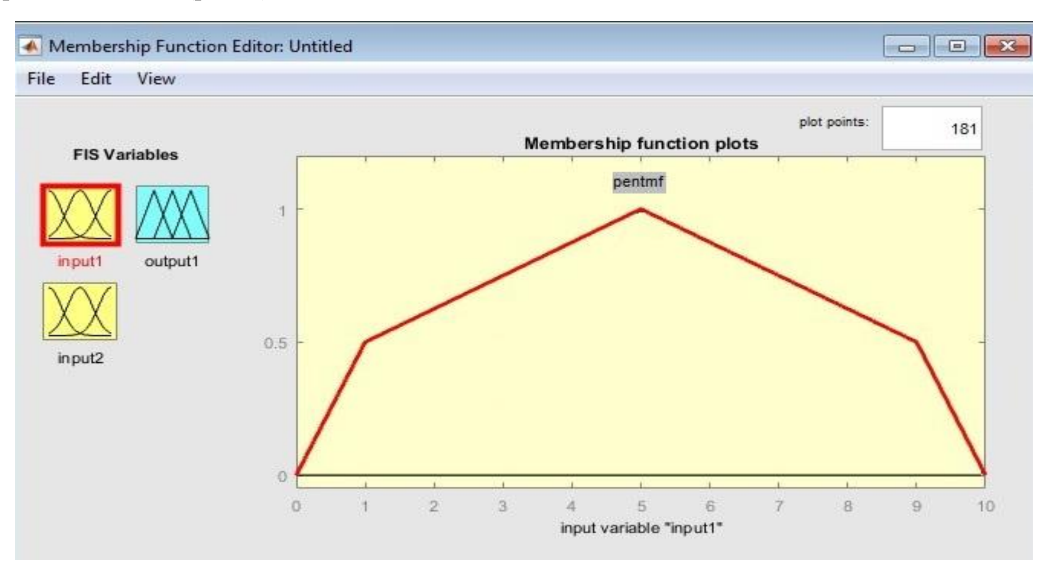



Рис. 5. Пятиугольная функция принадлежности в программной среде *MATLAB*

Для исследования пятиугольной функции принадлежности в программной среде необходимо ее описать в виде программного кода. При реализации алгоритмов[4,5] в пакете прикладных программ *Fuzzy Logic Toolbox* программной среды *MATLAB*, разработана пользовательская пятиугольная функция принадлежности. Данное средство позволяет исследовать математические модели и алгоритмы, основанные на применении теории нечеткой логики.

Для оценки точности неопределенности при работе с описанными функциями принадлежности необходимо провести вычислительный эксперимент. Сравнение целесообразно проводить на одном и том же наборе исходных данных. Значения вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий вычислены в «умеренных условиях» (фактические значения: скорость ветра 3 м/с, интенсивность атмосферных осадков 0,8 мм/ч, температура воздуха 5 ºС) и «очень сложных условиях» (фактические значения: скорость ветра 12 м/с, интенсивность атмосферных осадков 3,5 мм/ч, температура воздуха – 6 ºС) внешней среды.

С использованием средств *MATLAB* оценено быстродействие работы программного комплекса, реализующего разработанный алгоритм[4] в зависимости от используемой формы функции принадлежности. Для проведения вычислительного эксперимента использована *IBM*-совместимая ПЭВМ с минимальными системными требованиями (P4 – 2500 MHz, 2048 Mb RAM, операционная система семейства *Windows*). Были оценены треугольные, трапециевидные, пятиугольные и гауссовы функции принадлежности. Результаты представлены в таблице 1.

[4] Программный комплекс оценки точности неопределенности и быстродействия нечетких алгоритмов для управления беспилотным летательным аппаратом : патент № 2022613419 Рос. Федерация / Д. Г. Белоножко, И. Д. Королев, Ю. О. Чернышев. № 2022613002 ; заявл. 25.02.2022 ; опубл. 14.03.2022.

[5] Программный комплекс интеллектуального управления беспилотным летательным аппаратом в условиях деструктивных воздействий на основе пятиугольных функций принадлежности : патент № 2022613691 Рос. Федерация / Д. Г. Белоножко, И. Д. Королев, Ю. О. Чернышев. № 2022613009 ; заявл. 04.02.2022 ; опубл. 15.03.2022.

Таблица 1

Среднее время работы программного комплекса

| Тип используемой функции принадлежности | Время, с | |
|---|---|---|
| | «Умеренные условия»: скорость ветра 3 м/с, интенсивность атмосферных осадков 0,8 мм/ч, температура воздуха 5 ºC | «Очень сложные условия»: скорость ветра 12 м/с, интенсивность атмосферных осадков 3,5 мм/ч, температура воздуха — 6 ºC |
| Треугольная | 0,028 | 0,028 |
| Трапециевидная | 0,031 | 0,03 |
| Пятиугольная | 0,034 | 0,035 |
| Гауссова | 0,031 | 0,03 |

Из таблицы 1 можно заключить, что программа для ЭВМ, построенная на использовании треугольных функций принадлежности, обладает более высоким быстродействием в сравнении с остальными.

Перспективным направлением исследований является изучение влияния формы функции принадлежности на точность вычислений вероятности повреждения БЛА при неопределенности воздействий атмосферных факторов внешней среды на функционирование БЛА.

**Обсуждение и заключения.** Разработана методика определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды, основанная на математическом аппарате нечетких множеств. Нечеткие качественные оценки позволяют значительно расширить традиционные методы математического моделирования, требующие точной информации о входных величинах. Использование данной методики позволяет оценить вероятность повреждения БЛА, когда исходы альтернатив известны неточно и вероятности их наступления оцениваются с помощью функций принадлежности. Полученные значения вероятностей повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий внешней среды могут использоваться на этапе предполётной подготовки и в процессе полёта для оценки целесообразности дальнейшего выполнения полётного задания.

С помощью программного комплекса, реализующего данную методику, получены значения вероятности повреждения БЛА в «умеренных условиях» и «очень сложных условиях» внешней среды. По результатам проведенного анализа применения данных форм функций принадлежности и вычислительного эксперимента подтверждено высокое быстродействие программного комплекса, использующего треугольный способ формализации нечетких множеств. Существенным преимуществом треугольных функций принадлежности является то, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями объем информации.

Таким образом, в бортовых вычислителях СУ БЛА для оценки атмосферных параметров среды целесообразно применять алгоритмы, использующие треугольные функции принадлежности. Это обеспечит высокое быстродействие работы СУ БЛА в условиях использования вычислителей с низкой производительностью.

**Список литературы**

1. Fractional Order PID-Based Adaptive Fault-Tolerant Cooperative Control of Networked Unmanned Aerial Vehicles against Actuator Faults and Wind Effects with Hardware-in-the-Loop Experimental Validation / Ziquan Yu, Youmin Zhang, Bin Jiang, [et al.] // Control Engineering Practice. — 2021. — Vol. 114. — Art. 104861. http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104861

2. Веселов, Г. Е. Синергетический синтез закона управления БПЛА в условиях ветровых возмущений с входными ограничениями / Г. Е. Веселов, И. А. Ингабире Алин // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2020. — № 2 (212). — С. 101–112. https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-101-112

3. Adaptive Super-Twisting Trajectory Tracking Control for an Unmanned Aerial Vehicle under Gust Winds / Lei Cui, Ruizhi Zhang, Hongjiu Yang, Zhiqiang Zuo // Aerospace Science and Technology. — 2021. — Vol. 115. — Art. 106833. http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2021.106833

4. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа / И. Е. Кузнецов, А. В. Мельников, Е. А. Рогозин, О. В. Страшко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2018. — Т. 45, № 2. — С. 125–139. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

5. The Mathematical Model of Characteristics of the Convective Unstable Atmosphere Taking into Account Microphysical Processes in Clouds / I. E. Kuznetsov, O. V. Strashko, V. V. Dorofeev, D. V. Gotsev // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — P. 012170. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012170

6. Лохин, В. М. Повышение адаптивных свойств автономных роботов на базе интеллектуальных технологий / В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов // Экстремальная робототехника. — 2015. — Т. 1, № 1. — С. 59–67.

7. Белоножко, Д. Г. Алгоритм обеспечения требуемого уровня устойчивости управления беспилотным летательным аппаратом в условиях противодействия / Д. Г. Белоножко // Программные продукты и системы. — 2022. — Т. 35, № 1. — С. 197–206.

8. Санько, А. А. Влияние ветра на систему угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата / А. А. Санько, И. В. Рожков, А. А. Шейников // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. — 2019. — № 1. — С. 41–51.

9. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. — 1965. — Vol. 8. — P. 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

10. Piegat, A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. — Springer, 2001. — 728 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6

11. Селиванов, В. В. Влияние живучести на боевую и военно-экономическую эффективность военно-технических систем / В. В. Селиванов, Ю. Д. Ильин // Военная мысль. — 2021. — № 9. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zhivuchesti-na-boevuyu-i-voenno-ekonomicheskuyu-effektivnost-voenno-tehnicheskih-sistem (дата обращения : 08.07.2022).

12. Существующие способы формализации нечеткостей в транспортных процессах / Ю. О. Чернышев, А. В. Требухин, П. А. Панасенко, Д. Г. Белоножко // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 7 (79). — С. 57–79.

13. Pathinathan, T. Reverse Order Triangular, Trapezoidal and Pentagonal Fuzzy Numbers / T. Pathinathan, K. Ponnivalavan // Annals of Pure and Applied Mathematics. — 2015. — Vol. 9. — P. 107–117.

14. The Pentagonal Fuzzy Number: Its Different Representations, Properties, Ranking, Defuzzification and Application in Game Problems / Avishek Chakraborty, Sankar Prasad Mondal, Shariful Alam [et al.] // Symmetry. — 2019. — Vol. 11. — P. 1–31. http://dx.doi.org/10.3390/sym11020248

Поступила в редакцию 08.07.2022
Поступила после рецензирования 22.07.2022
Принята к публикации 25.07.2022

*Об авторах:*

**Белоножко Дмитрий Григорьевич,** заместитель начальника отдела, начальник «Научно-исследовательской лаборатории», Краснодарского высшего военного училища им. С. М. Штеменко (350009, РФ, г. Краснодар, ул. Грибоедова, 18), ORCID, staeer@rambler.ru

**Королев Игорь Дмитриевич,** профессор кафедра «Защиты информации специальными методами и средствами», Краснодарское высшее военное училище им. С. М. Штеменко (350009, РФ, г. Краснодар, ул. Грибоедова, 18), доктор технических наук, профессор, ORCID, pi_korolev@mail.ru

**Чернышев Юрий Олегович,** профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, myvnn@list.ru

**Венцов Николай Николаевич,** доцент кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, vencov@list.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Д. Г. Белоножко — анализ литературных источников, постановка задачи, проведение исследований, разработка математической модели и алгоритма, проведение расчетов и описание полученных результатов. И. Д. Королев — научное руководство, формирование концепции исследования, формулирование выводов исследования. Ю. О. Чернышев — формирование структуры статьи, описание результатов, критический анализ, редактирование текста. Н. Н. Венцов — анализ литературных источников, участие в исследовании, редактирование текста.

*Конфликт интересов*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*